

# بررسی تغییر شکل میان‌گذر دریاچه ارومیه با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری

رقیه شمشیری<sup>۱\*</sup>، مهدی معتق<sup>۲</sup>، محمدعلی شریفی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد سنجش از دور - گروه مهندسی نقشه‌برداری - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران  
r.shamshiri@ut.ac.ir

<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران  
motagh@ut.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشیار گروه مهندسی نقشه‌برداری - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران  
sharifi@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت اردیبهشت ۱۳۹۲، تاریخ تصویب خرداد ۱۳۹۳)

## چکیده

پل دریاچه ارومیه به طول ۱۳۰۰ متر و عرض ۳۰ متر به‌منظور اتصال دو خاکریز آذربایجان غربی و شرقی در اواخر سال ۲۰۰۹ ساخته شده است. ساخت این پل نقش مهمی در توسعه‌ی گردشگری، حمل‌ونقل و بازرگانی منطقه دارد. از آنجا که تغییر شکل نامتقارن خاکریزهای موجود در طرفین پل ممکن است به سلامت پل آسیب برساند، مسأله پایش دقیق خاکریزها در زمان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

پوشش وسیع، قدرت تفکیک مکانی (۲۰-۱ متر) و زمانی (۴۶-۱۱ روز) بالا و دقت قابل قبول (میلی‌متر-سانتی‌متر)، داده‌های تداخل-سنجی راداری را به ابزاری قدرتمند در این‌گونه مطالعات تبدیل کرده است. در میان روش‌های تداخل‌سنجی راداری، روش‌های تحلیل سری زمانی مانند خطوط مبنای کوتاه<sup>۱</sup>، ابزاری قدرتمند در زمینه پایش سازه‌ها هستند که نقشه‌های تغییر شکل را با دقت میلی‌متر فراهم می‌کنند.

در این مطالعه، روش فوق در مجموع بر روی ۵۸ تصویر سنجنده‌های ALOS, ENVISAT و TerraSAR-X (TSX) از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۳، بکار گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد تغییر شکل در این بازه زمانی با حداقل سرعت بیشینه‌ی ۵۰ میلی‌متر در سال در جهت خط دید ماهواره<sup>۲</sup> روی خاکریزها در حال وقوع است و در طول این زمان بر سرعت تغییر شکل افزوده شده است.

**واژگان کلیدی:** تداخل‌سنجی راداری، تغییر شکل، میان‌گذر دریاچه ارومیه

\* نویسنده رابط

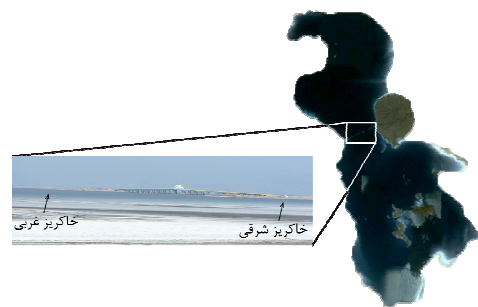
<sup>۱</sup> Small BAseline Subset (SBAS)  
<sup>۲</sup> Line Of Sight (LOS)

## ۱- مقدمه

پل‌ها یکی از سازه‌های مهم در سیستم حمل‌ونقل هستند و از جنبه‌های اجتماعی، اقتصادی، اکولوژیکی و فرهنگی بر زندگی بشر تأثیر می‌گذارند. از این رو تغییر شکل پل می‌تواند یک مشکل جدی باشد، زیرا ممکن است خسارات مالی و جانی فراوانی وارد کند. به همین دلیل پایش پل‌ها بسیار مهم است.

اهمیت اطلاعات بدست آمده از طریق پایش، در چندین حوزه آشکار است. نخست این‌که موجب پیشرفت دانش مربوط به رفتار سازه و تنظیم دقیق مدل‌های عددی که رفتار سازه را پیش‌بینی می‌کنند، می‌شود. دوم این‌که با پایش دائمی می‌توان علائم اولیه ناشی از وجود نقوص در سازه را متوجه شد. بنابراین می‌توان شاخص ایمنی را در طول زمان در نظر گرفت و بلافاصله و با کمترین تلفات مالی اقدامات لازم جهت ترمیم سازه را انجام داد. و در نهایت، پایش در طول هر دوره‌ی زمانی از عمر پل مهم است و اطلاعات با ارزشی به‌منظور دانش بهتر رفتار سازه را می‌دهد و در نتیجه موجب برنامه‌ریزی بهتر و مدیریت کم‌هزینه‌تر می‌گردد [۱].

منطقه مورد مطالعه، دریاچه ارومیه، در شمال‌غربی ایران با طول و عرض جغرافیایی به ترتیب  $45/5$  و  $37/5$  واقع شده‌است. این دریاچه بین استان‌های آذربایجان شرقی و غربی است.



(ب)

(الف)

شکل ۱- (الف) دریاچه ارومیه روی Google Earth، (ب) بزرگ نمایی میان‌گذر دریاچه ارومیه که از سه بخش تشکیل شده است: خاکریز غربی، خاکریز شرقی و پل که دو خاکریز را بهم وصل کرده است

سال ۱۹۹۰ ساخته شده‌اند. و یک پل که در اواخر دهه ۲۰۰۹ ساخته شده‌است و این دو خاکریز را بهم وصل می‌کند. این پل به طول تقریبی ۱۳۰۰ متر و عرض ۳۰ متر از پروژه‌های عظیم ایرانی به‌شمار می‌رود و نقش مهمی در توسعه‌ی مبادلات فرهنگی، گردشگری، حمل‌ونقل و بازرگانی دارد. به دلیل دارا بودن شرایط خاص محیطی نظیر خورندگی بسیار بالا، بستر ناپایدار دریاچه و از طرفی تغییر شکل نامتقارن خاکریزهای موجود در طرفین پل، مسأله پایش اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند.

روش‌های نقشه‌برداری مرسوم مانند ترازبایی و سیستم تعیین‌موقعیت جهانی، اطلاعات دقیق مربوط به تغییر شکل سازه را در نقاط از پیش تعیین شده می‌دهند. اما برای مناطق وسیع، زمان‌بر، پرهزینه و پرحمت هستند [۲]. از طرفی بر روی میان‌گذر دریاچه ارومیه اندازه‌گیری‌های میدانی دقیقی وجود ندارد. در مقایسه با روش‌های فوق، روش تداخل‌سنجی تفاضلی رادار نقشه‌های مترکم با پوشش وسیع، قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا و مقرون به‌صرفه فراهم می‌کنند و برای مطالعه تغییر شکل مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳]. اما این روش‌ها نیز محدودیت‌هایی نظیر عدم همبستگی زمانی و هندسی و اختلالات جوی دارند.

روش‌های سری زمانی مثل تداخل‌سنجی پراکنده‌ساز پایدار<sup>۱</sup> [۴-۶] و خطوط مبنای کوتاه [۷،۸] این مشکلات را حل کرده است. به‌جای تحلیل یک اینترفروگرام، این روش‌ها سری زمانی تغییر شکل را در پیکسل‌های قابل اعتماد فراهم می‌کند. توانایی روش‌های سری زمانی در موارد مختلف نظیر زمین‌لغزش [۹،۱۰]، حرکت ماگما ناشی از فعالیت کوه‌های آتشفشانی [۱۱]، نشست زمین [۱۲-۱۵]، پایش فعالیت‌های گسل [۱۶،۱۷] ثابت شده است. در این مطالعه یکی دیگر از قابلیت‌های روش‌های مذکور در پایش سازه‌ای مهندسی به اثبات رسیده است.

## ۲- داده‌ها و روش کار

در این مطالعه تصاویر راداری سه سنجنده ALOS, ENVISAT و TerraSAR-X (TSX) با استفاده از روش خطوط مبنای کوتاه پردازش شده‌اند. در این بخش مشخصات تصاویر و روش فوق ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده‌است، میان‌گذر دریاچه ارومیه از سه بخش تشکیل شده است: خاکریز به طول تقریبی ۱۰ کیلومتر از سمت استان آذربایجان غربی و حدود ۳ کیلومتر از سمت استان آذربایجان شرقی که در

<sup>۱</sup> Permanent Scatterer Interferometry (PSI)

## ۲-۱- داده‌ها

جفت تصاویری با کمترین خطوط مبنای زمانی و مکانی و فرکانس داپلر مرکزی<sup>۲</sup> تولید می‌شوند [۱۸].

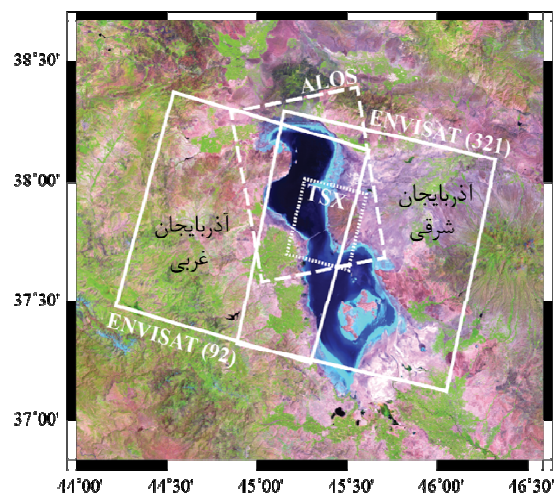
در این مطالعه ۴۳، ۲۳، ۲۳ و ۵۱ اینترفروگرام به ترتیب از بین تصاویر ENVISAT (مسیر ۳۲۱)، ENVISAT (مسیر ۹۲)، ALOS و TSX با روش تکرار گذر<sup>۳</sup> تحت نرم‌افزار DORIS [۱۹] تولید شده است. شبکه اینترفروگرام‌های مورد استفاده در این روش در شکل ۳ نشان داده شده است. به‌منظور حذف اثر انحنای زمین و فاز ارتفاعی و زمین مرجع کردن از مدل رقومی زمین SRTM<sup>۴</sup> با ابعاد ۹۰ متر استفاده شده است.

در مرحله‌ی بعد با تحلیل دامنه و فاز، پیکسل‌هایی با پراکنش پایدار شناسایی می‌شوند. سپس فاز این پیکسل‌ها بازیابی شده و ترم‌های نویز آن حذف می‌شوند. در نهایت فاز ناشی از تغییر شکل بدست می‌آید. تعداد بالای اینترفروگرام‌ها در این روش، باعث ایجاد افزونگی داده می‌شود. لذا فاز تغییر شکل با روش کمترین مربعات بدست می‌آید. این مراحل با استفاده از نرم‌افزار StaMPS انجام شده است [۲۰].

## ۳- نتایج

سرعت تغییر شکل بدست آمده از پردازش تصاویر ENVISAT (مسیر ۳۲۱)، ENVISAT (مسیر ۹۲)، ALOS و TSX به‌ترتیب در اشکال ۴-۷ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در طول خاکریزها بر سرعت تغییر شکل بدست آمده توسط سنجنده‌های ENVISAT (مسیر ۳۲۱)، ENVISAT (مسیر ۹۲)، ALOS و TSX در راستای LOS به‌ترتیب ۶۵، ۵۰، ۷۵ و ۸۵ میلی‌متر در سال است. با نادیده فرض کردن جابجایی افقی، این مقادیر به‌ترتیب ۷۰، ۵۳، ۹۶ و ۹۴ میلی‌متر در سال در راستای قائم خواهد بود.

در این مطالعه، از ۲۰ تصویر ENVISAT (مسیر ۳۲۱) از ۲۰۰۳/۰۹/۰۳ تا ۲۰۰۶/۱۱/۰۱، ۱۰ تصویر ENVISAT (مسیر ۹۲) از ۲۰۰۷/۰۷/۲۳ تا ۲۰۱۰/۰۹/۲۰ در مسیر پایین‌گذر با زاویه برخورد<sup>۱</sup> ۲۱°، ۱۰ تصویر ALOS در بازه‌ی زمانی ۲۰۰۶/۱۲/۲۶ تا ۲۰۱۰/۰۷/۰۶ در مسیر بالا-گذر با زاویه برخورد ۳۹° و ۱۸ تصویر TSX از ۲۰۱۲/۰۵/۲۰ تا ۲۰۱۳/۰۱/۲۸ در مسیر پایین‌گذر با زاویه برخورد ۲۶° استفاده شده است. پوشش مکانی این تصاویر در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- منطقه مطالعاتی بر روی تصویر Landsat. پوشش مکانی سنجنده‌های ENVISAT (با زاویه برخورد ۲۱°)، ALOS (با زاویه برخورد ۳۹°) و TSX (با زاویه برخورد ۲۶°) که به‌ترتیب با کادرهای ضخیم، خط‌چین و نقطه‌چین نمایش داده شده است.

## ۲-۲- روش کار

یکی از پرکاربردترین و دقیق‌ترین روش‌های پیشرفته سری زمانی، روش خطوط مبنای کوتاه است. که بطور کلی از سه مرحله تشکیل شده است: تولید اینترفروگرام-هایی با خطوط مبنای کوتاه، انتخاب پیکسل‌هایی با فاز ثابت و مرحله نهایی شامل بازیابی فاز و معکوس‌سازی با روش کمترین مربعات.

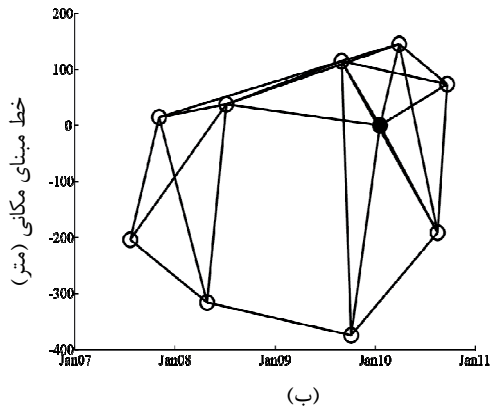
این روش برای غلبه بر مشکل عدم همبستگی اینترفروگرام ارائه شده است. لذا به‌منظور کمینه‌سازی اثرات ناشی از عدم همبستگی، اینترفروگرام‌ها از میان

<sup>۲</sup> frequencyDoppler centroid

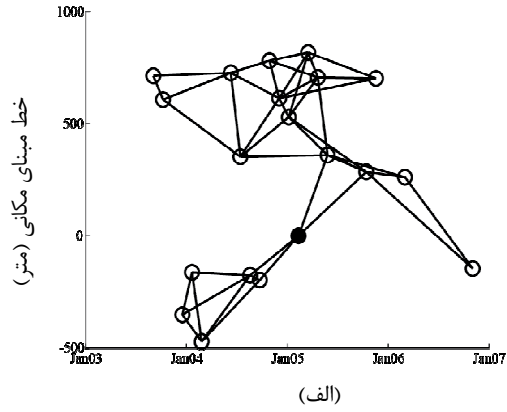
<sup>۳</sup> repeat-pass

<sup>۴</sup> Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)

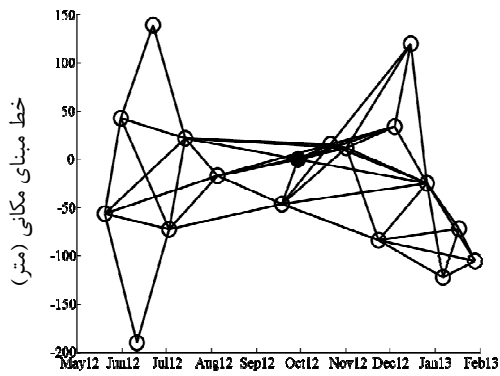
<sup>۱</sup> Incident angle



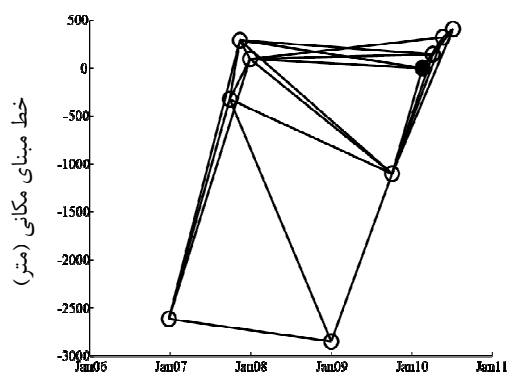
(ب)



(الف)



(ت)

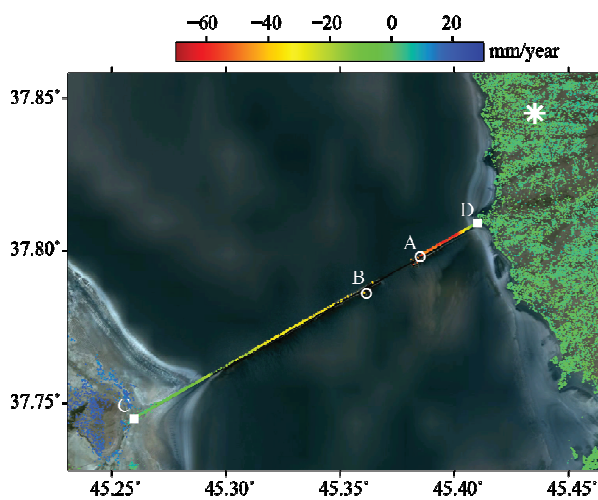


(پ)

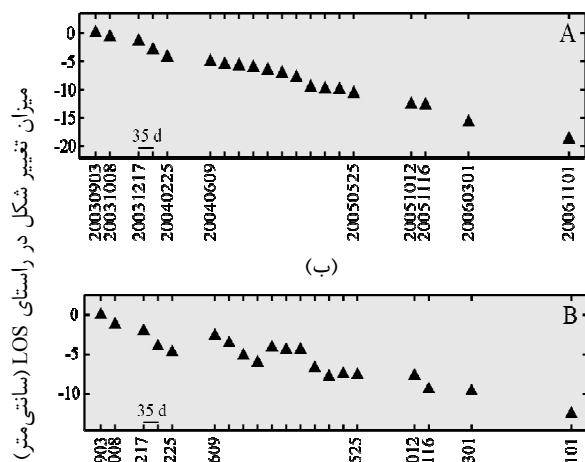
شکل ۳- شبکه اینترفروگرام‌های مورد استفاده در روش خطوط مبنای کوتاه با تصاویر (الف) ENVISAT (مسیر ۳۲۱)، (ب) ENVISAT (مسیر ۳۲۱)، (پ) ALOS و (ت) TSX. دایره نشان‌دهنده تصاویر، دایره توپر بیانگر تصویر مرجع و خطوط بیانگر اینترفروگرام‌های بین زوج تصاویر است. (۹۲)

شکل ۴-۷ (ب، پ) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر دوره‌ی زمانی تغییر شکل با سرعت خطی در حال افزایش است. همچنین بین تغییر شکل دو دماغه، اختلاف وجود دارد. لذا تغییر شکل نامتقارن موجود در دو سمت پل ممکن است به سلامت پل آسیب برساند.

با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، علاوه بر تعیین سرعت تغییر شکل، می‌توان میزان تغییر در طول زمان را نیز برای هر پیکسل با پراکنش پایدار تعیین نمود. سری زمانی دو پیکسل در دماغه‌ی خاکریزها در دو طرف پل (که در تصاویر ۴-۷ (الف) با A و B نشان داده شده است)، در

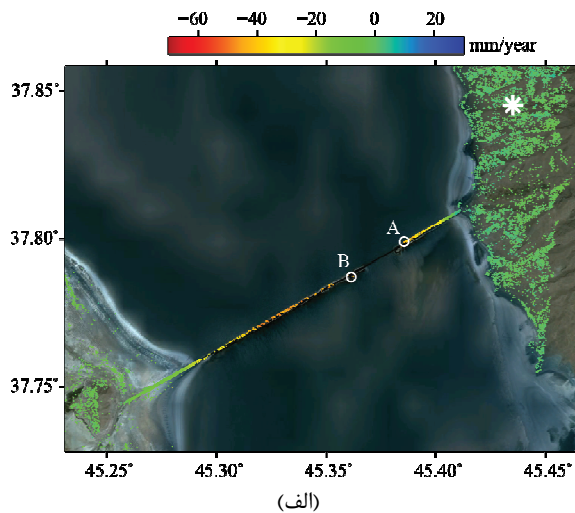


(الف)

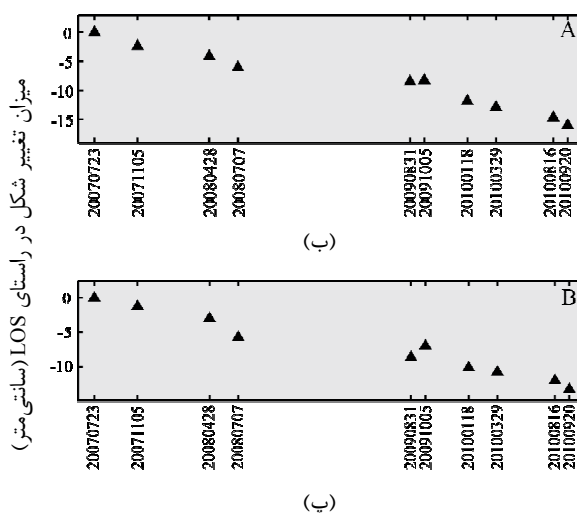


(ب)

شکل ۴- (الف) سرعت تغییر شکل میان‌گذر دریاچه ارومیه با تصاویر ENVISAT (مسیر ۳۲۱) در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۶. منطقه مرجع با ستاره مشخص شده است. تصاویر (ب) و (پ) سری زمانی دو نقطه A و B (مشخص شده در شکل (الف)) است.

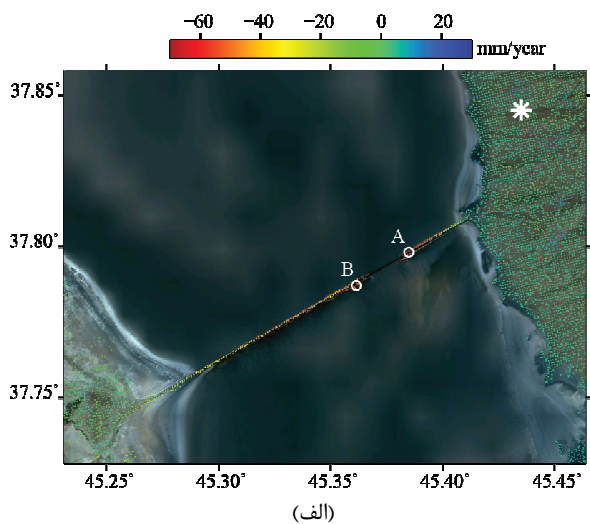


(الف)

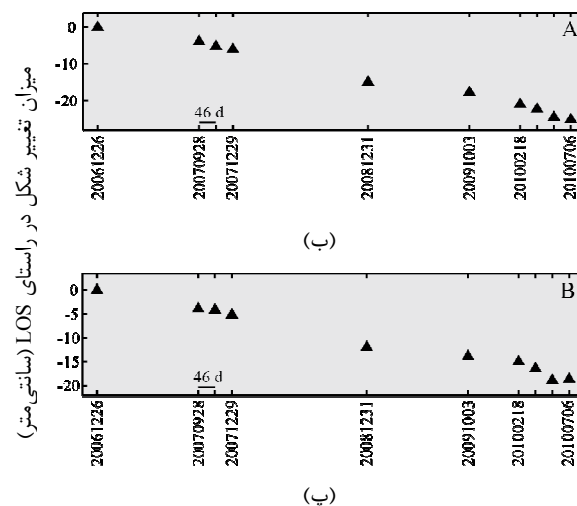


(ب)

شکل ۵- (الف) سرعت تغییر شکل میان گذر دریاچه ارومیه با تصاویر ENVISAT (مسیر ۹۲) در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰. منطقه مرجع با ستاره مشخص شده است. تصاویر (ب) و (پ) سری زمانی دو نقطه A و B (مشخص شده در شکل (الف)) است.

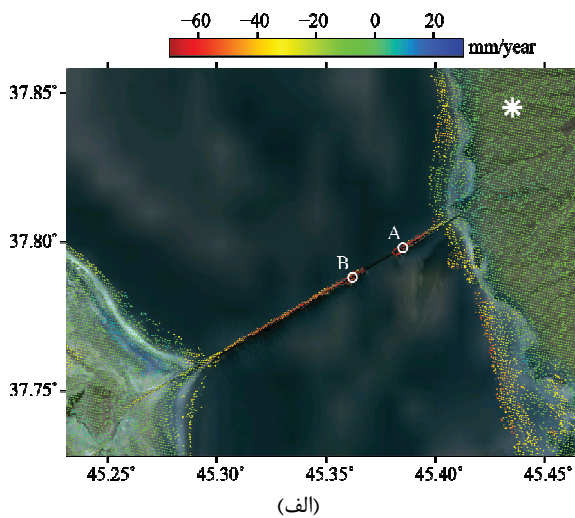


(الف)

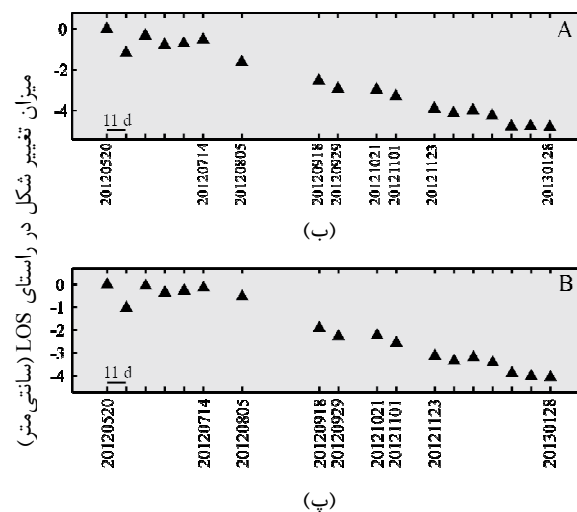


(ب)

شکل ۶- (الف) سرعت تغییر شکل میان گذر دریاچه ارومیه با تصاویر ALOS در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰. منطقه مرجع با ستاره مشخص شده است. تصاویر (ب) و (پ) سری زمانی دو نقطه A و B (مشخص شده در شکل (الف)) است.



(الف)



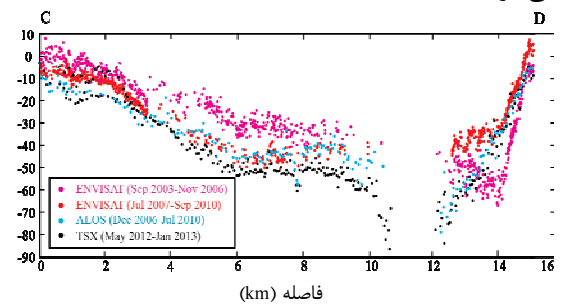
(ب)

شکل ۷- (الف) سرعت تغییر شکل میان گذر دریاچه ارومیه با تصاویر TSX در بازه زمانی ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۳. منطقه مرجع با ستاره مشخص شده است. تصاویر (ب) و (پ) سری زمانی دو نقطه A و B (مشخص شده در شکل (الف)) است.



به منظور مقایسه بهتر، پروفیل سرعت تغییر شکل در طول میان‌گذر از نقطه C تا D (شکل ۴. الف) در شکل ۸ نشان داده شده است. نقاط بنفش، قرمز، آبی و مشکی به ترتیب سرعت تغییر شکل بدست آمده از ENVISAT (مسیر ۳۲۱)، ENVISAT (مسیر ۹۲)، ALOS و TSX را مشخص می‌کند.

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، بطور کلی هرچه از مبدأ خاکریزها (صفر کیلومتر و ۱۵ کیلومتر) به سمت پل نزدیک‌تر می‌شویم بر نرخ تغییر شکل افزوده می‌شود.



شکل ۸- پروفیل سرعت تغییر شکل میان‌گذر دریاچه ارومیه از نقطه C تا D (در شکل ۴. الف مشخص شده است) نقاط بنفش، قرمز، آبی و مشکی به ترتیب سرعت تغییر شکل بدست آمده از ENVISAT (مسیر ۳۲۱)، ENVISAT (مسیر ۹۲)، ALOS و TSX در امتداد میان‌گذر است.

همان‌طور که در پروفیل ENVISAT (مسیر ۳۲۱) دیده می‌شود، از ۱۵ کیلومتر (مبدأ خاکریز شرقی) تا ۱۳/۵ کیلومتر به میزان ۵۵ میلی‌متر بر سال بر سرعت تغییر شکل افزوده می‌شود. از ۱۳/۵ کیلومتر تا دماغه خاکریز شرقی، از سرعت تغییر شکل به میزان ۲۰ میلی‌متر بر سال کاسته می‌شود. اما در پروفیل ENVISAT (مسیر ۹۲) سرعت تغییر شکل در طول خاکریز شرقی، به میزان ۵۰ میلی‌متر بر سال افزایش می‌یابد.

طبق گزارش شرکت صدرا (شرکت سازنده پل) در سال ۲۰۰۵ یک گسیختگی بزرگ در ۱۳/۵ کیلومتر به علت پیچش خاکریز شرقی اتفاق افتاده است. بنابراین تغییر شکل بالا در ۱۳/۵ کیلومتر نسبت به مناطق اطراف که توسط سنجنده ENVISAT (مسیر ۳۲۱) بدست آمده بود، نشان - دهنده همان گسیختگی است. سرعت تغییر شکل در خاکریز غربی در سال‌های ۲۰۰۳-۲۰۰۷، ۳۰ میلی‌متر بر سال بوده است، در سال‌های ۲۰۰۷-۲۰۱۰، به ۴۰ میلی‌متر بر سال رسیده است و در سال ۲۰۱۲-۲۰۱۳، به ۸۰ میلی‌متر بر سال افزایش یافته است. همچنین اختلاف بین پروفیل‌های

ALOS و ENVISAT (مسیر ۹۲) در بازه زمانی مشترک ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ در خاکریز شرقی نشان‌دهنده جابجایی افقی در خاکریز است که در بخش ۴-۱ بررسی می‌شود.

#### ۴- بحث

این بخش شامل چهار قسمت است، در بخش نخست سرعت تغییر شکل در بازه‌ی زمانی ۲۰۰۷-۲۰۱۰ در دو راستای قائم (نشست) و شرقی-غربی تجزیه شده است. در بخش دوم ارتباط جابجایی میان‌گذر در دو راستا با نوسانات سطح آب بررسی می‌شود. در بخش سوم علت تفاوت سرعت تغییر شکل با توجه به تفاوت در نوع لایه‌بندی ذکر می‌شود و در بخش نهایی عملکرد سنجنده‌ها بررسی می‌شود.

#### ۴-۱- تصویر سرعت تغییر شکل در دو راستا

تغییر شکل‌های بدست‌آمده با استفاده از روش‌های تداخل‌سنجی راداری، در راستای LOS است. با استفاده از معادله زیر می‌توان میزان جابجایی در سه راستا را بدست آورد.

$$[\Delta LOS] = \begin{bmatrix} d_e \\ d_n \\ d_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\cos \alpha \times \sin \theta & \sin \alpha \times \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

در این رابطه  $\Delta LOS$ ، تغییر شکل در راستای LOS،  $\alpha$  آزیموت مدار ماهواره،  $\theta$  زاویه میل ماهواره،  $d_e$  و  $d_n$  به ترتیب جابجایی در سه راستای شرقی-غربی، شمالی-جنوبی و قائم است [۲۱]. ولی برای این کار می‌بایست در یک بازه زمانی مشخص، سه تغییر شکل  $\Delta LOS$  داشته باشیم. می‌توان با نادیده فرض کردن جابجایی در راستای شمالی-جنوبی، با استفاده از معادله زیر، تغییر شکل را در راستای قائم و شرقی-غربی تصویر نمود.

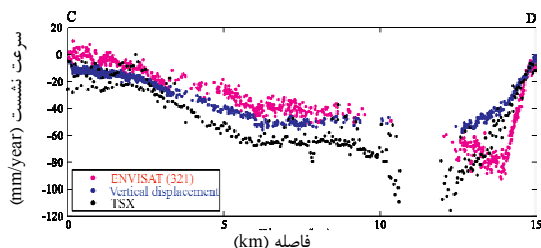
$$[\Delta LOS] = \begin{bmatrix} d_e \\ d_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\cos \alpha \times \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

شکل ۹ سرعت نشست و حرکت در راستای شرقی-غربی بدست آمده از تصاویر ALOS و ENVISAT در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۹ (الف) مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله از مبدأ و نزدیک شدن به پل، بر میزان سرعت نشست هر دو خاکریز افزوده می‌شود. به طوری که از یک کیلومتری مبدأ خاکریز غربی تا ۶/۵

نادیده فرض کرد و تغییر شکل در راستای LOS را با رابطه زیر به راستای قائم تصویر کرد.

$$d_v = \frac{\Delta LOS}{\cos \theta} \quad (3)$$

شکل ۱۰ پروفیل سرعت جابجایی در راستای قائم را با نادیده فرض کردن جابجایی افقی نشان می‌دهد. نقاط قرمز، آبی و مشکی به ترتیب سرعت نشست بدست آمده از ENVISAT (مسیر ۳۲۱) در سال ۲۰۰۳-۲۰۰۷، سرعت نشست محاسبه شده با ENVISAT (مسیر ۹۲) و ALOS در بازه زمانی ۲۰۰۷-۲۰۱۰ و سرعت نشست بدست آمده از TSX در ۲۰۱۲-۲۰۱۳ است. با مقایسه سرعت نشست در بازه ۲۰۰۳-۲۰۰۷ با ۲۰۱۲-۲۰۱۳، که هر دو نتایج پردازش تصاویر اخذ شده در مدار پایین‌گذر هستند، می‌توان به این نتیجه رسید که در خاکریز شرقی از ۱۳/۵ کیلومتر تا ۱۲/۵ کیلومتر با بیشینه مقدار ۵۰ میلی‌متر در سال بر سرعت نشست افزوده شده است. همچنین سرعت نشست از مقطع ۴ کیلومتر تا ۱۰/۵ کیلومتر به‌طور متوسط ۴۰ میلی‌متر در سال افزایش یافته است. دلیل افزایش در سرعت نشست در این بازه زمانی در بخش ۴-۲ بررسی شده است.



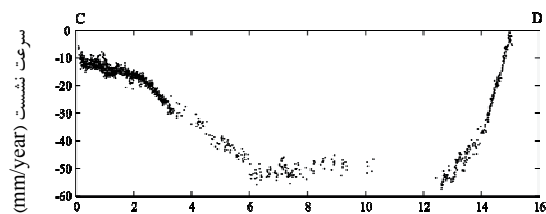
شکل ۱۰- پروفیل سرعت نشست در طول میان‌گذر دریاچه ارومیه از نقطه C تا D (در شکل ۴ الف مشخص شده است). نقاط قرمز، آبی و مشکی به ترتیب سرعت نشست بدست آمده از ENVISAT (مسیر ۳۲۱)، سرعت نشست محاسبه شده با ENVISAT (مسیر ۹۲) و ALOS و سرعت نشست بدست آمده از TSX در امتداد میان‌گذر است.

#### ۲-۴- ارتباط تغییر شکل با نوسانات سطح آب

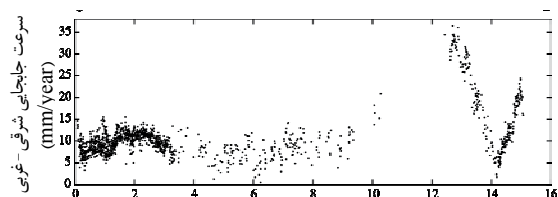
در این بخش ارتباط نوسانات سطح آب و تغییر شکل در دو راستای قائم و شرقی-غربی بررسی شده است. برای محاسبه میزان همبستگی<sup>۱</sup> این ارتباط، ابتدا میانگین پروفیل نشست و حرکت شرقی-غربی میان‌گذر بدست آمده در بخش ۴-۱ در هر تاریخ، محاسبه شد. سپس ارتفاع سطح آب دریاچه از طریق ارتفاع‌سنج راداری در هر تاریخ اخذ داده‌ی راداری بدست آمد.

<sup>۱</sup> Correlation

کیلومتری، سرعت نشست از ۱۰ میلی‌متر در سال به ۵۰ میلی‌متر در سال افزایش یافته و پس از آن تا انتهای خاکریز ۵ میلی‌متر در سال از سرعت نشست کاسته شده است. سرعت نشست خاکریز شرقی نیز از ۱۵ کیلومتری مبدأ تا ۱۲/۵ کیلومتری، به ۵۵ میلی‌متر در سال افزایش یافته است. اگر این نشست ادامه داشته باشد، اختلاف ۱۰ میلی‌متر در سال در سرعت نشست بین دو دماغه خاکریز، ممکن است به سلامت پل آسیب بزند. شکل ۹ (ب) سرعت حرکت در راستای شرقی-غربی را نشان می‌دهد. سرعت مثبت بیانگر حرکت به سمت شرق و سرعت منفی نشان‌دهنده حرکت به سمت غرب می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، خاکریز غربی با سرعت متوسط ۱۰ میلی‌متر در سال به سمت شرق حرکت می‌کند. سرعت حرکت به سمت شرق در خاکریز شرقی از ۱۵ کیلومتری مبدأ تا ۱۴ کیلومتری، ۲۵ میلی‌متر در سال کاهش یافته است و از ۱۴ کیلومتری تا ۱۲/۵ کیلومتری، ۳۵ میلی‌متر در سال افزایش یافته است. اگر این حرکت نیز ادامه داشته باشد، اختلاف ۲۰ میلی‌متر در سال در سرعت جابجایی فوق بین دو دماغه خاکریز، ممکن است به سلامت پل آسیب بزند. همچنین مقطع ۱۴ کیلومتر به دلیل وجود اختلاف در جابجایی نسبت به مقاطع اطراف و با توجه به این‌که مقطع ۱۳/۵ کیلومتر یکبار در سال ۲۰۰۵ گسیخته شده است، در معرض آسیب‌دیدگی مجدد قرار دارد.



(الف)

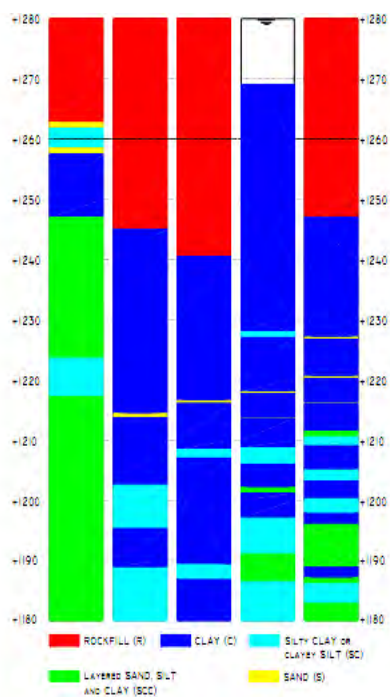


(ب)

شکل ۹- پروفیل سرعت (الف) نشست و (ب) حرکت در راستای شرقی-غربی میان‌گذر، بدست آمده از تصاویر ENVISAT و ALOS در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰

با مقایسه دو شکل ۹ الف و ۹ ب می‌توان به این نتیجه رسید که سرعت جابجایی افقی در مقایسه با جابجایی قائم ناچیز است. لذا می‌توان جابجایی افقی را

می‌شود، لایه‌بندی خاک در بستر دریاچه و خاکریز در نیمرخ طولی متفاوت است. هرچه از مقطع اول به سمت پل پیش می‌رویم، ضخامت لایه‌های رسی (لایه‌های آبی رنگ در شکل) و عمق نفوذ خاکریز (لایه‌های قرمز رنگ) افزایش می‌یابد. حضور لایه‌های رسی با چسبندگی و ضخامت متفاوت موجب می‌شود سرعت پراکندگی فشار حفره‌ای آب در طول خاکریز متغیر باشد. به همین دلیل سرعت تحکیم خاک در مقاطع مختلف، متفاوت خواهد بود. از این-رو سرعت تغییر شکل در امتداد میان‌گذر متغیر است.



شکل ۱۲- نیمرخ طولی از لایه‌بندی خاک در بستر دریاچه و میان‌گذر

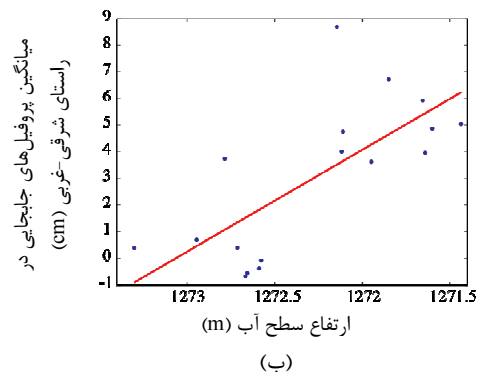
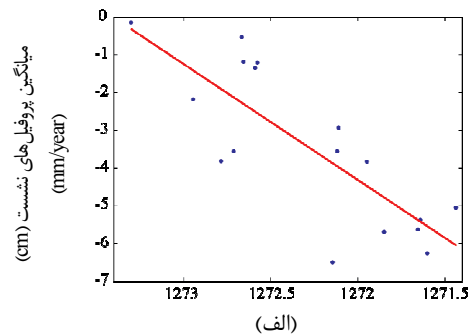
#### ۴-۴- مقایسه عملکرد سنجنده‌ها

یکی از مهم‌ترین مراحل پردازش حذف خطای بازایی فاز است. فرایند بازایی فاز بین دو پیکسلی انجام می‌شود که اختلاف فاز کمتر از  $\pi$  داشته باشند. لذا هر چه تراکم پیکسل-هایی با پراکنش ثابت بیشتر باشد، خطا کمتر خواهد بود. از سوی دیگر هر چه طول موج بزرگتر باشد، بدلیل اینکه اختلاف فاز کمتر می‌شود، بازایی فاز دقیق‌تر می‌شود. همچنین هر چه میزان همدوسی<sup>۲</sup> اینترفروگرام بیشتر باشد، خطای بازایی فاز کمتر خواهد شد. بازایی فاز در پردازش‌های سنجنده ALOS

<sup>۲</sup> Coherence

نتایج نشان می‌دهد میانگین پروفیل‌های نشست میان‌گذر با نوسانات سطح آب ارتباط  $0/80$  دارند. این ارتباط در شکل ۱۱ (الف) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، سرعت نشست خاکریز با کاهش سطح آب بیشتر می‌شود. زیرا تغییر سطح آب منجر به تغییر در فشار حفره‌ای آب می‌شود. به طوری که با کاهش سطح آب، فشار حفره‌ای کم می‌شود. لذا زهکشی در لایه‌های رسی به دلیل کاهش فشار آب، با سرعت بیشتری انجام می‌شود. به عبارت دیگر سرعت تحکیم افزایش می‌یابد. لذا بر نرخ نشست نیز افزوده می‌شود.

علاوه بر این میانگین جابجایی در راستای شرقی-غربی میان‌گذر با نوسانات سطح آب ارتباط  $0/72$  دارند. این ارتباط در شکل ۱۱ (ب) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل نیز مشاهده می‌شود، با کاهش سطح آب سرعت حرکت به سمت شرق بیشتر می‌شود.



شکل ۱۱- همبستگی  $0/80$  و  $0/72$  بین میانگین پروفیل‌های میان‌گذر (الف) در راستای قائم و (ب) در راستای شرقی-غربی با نوسانات سطح آب

#### ۴-۳- علت تفاوت در نرخ تغییر شکل

شکل ۱۲ نقشه لایه‌بندی خاک در بستر دریاچه و خاکریز را نشان می‌دهد. سه مقطع اول مربوط به خاکریز غربی، مقطع چهارم مربوط به پل و مقطع آخر، خاکریز شرقی است. همان‌طور که مشاهده



در این مطالعه، یکی از روش‌های تحلیل سری زمانی؛ خطوط مبنای کوتاه، بر روی ۳۰ تصویر ENVISAT و ۱۰ تصویر ALOS با پوشش زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰، بکار گرفته شد. نتایج نشان داد در این دوره‌ی زمانی، تغییر شکل با سرعت بیشینه بیش از ۵۰ میلی‌متر در سال در راستای LOS روی خاکریزها در حال وقوع است. به منظور پایش دقیق‌تر میان‌گذر از ۱۸ تصویر TerraSAR-X (TSX) که به‌دلیل داشتن قدرت تفکیک مکانی بالا (۱ متر) و دوره زمانی کوتاه (۱۱ روزه)، سنجنده‌ای بسیار کارآمد در پایش مکانی و زمانی سازه‌های عمرانی می‌باشد، استفاده شد. نتایج نشان داد در این دوره‌ی زمانی، تغییر شکل با سرعت بیشینه ۸۵ میلی‌متر در سال در راستای LOS روی خاکریزها در حال وقوع است. لذا می‌توان به این نتیجه رسید که به مرور زمان بر سرعت تغییر شکل افزوده می‌شود.

نتایج نشان می‌دهد داده‌های راداری و همچنین روش خطوط مبنای کوتاه، ابزار و روشی کارآمد در زمینه پایش سازه‌های عمرانی هستند. ولی با توجه به نسبی بودن نتایج تداخل‌سنجی راداری توصیه می‌شود دو ایستگاه گیرنده سیستم تعیین موقعیت جهانی در دو استان آذربایجان شرقی و غربی نصب شوند، تا تغییر شکل بدست آمده با روش بکارگرفته شده مطلق گردد.

بدلیل داشتن طول موج بزرگتر و همچنین همدوسی بالا، بسیار دقیق انجام شد. ولی در پردازش‌های سنجنده TSX با وجود داشتن همدوسی بسیار بالای اینترفروگرام‌ها، بدلیل داشتن طول موج به‌نسبت کوتاه، بازیابی فاز با خطا همراه شد. دلیل این مسئله اختلاف در سرعت تغییر شکل بین دماغه خاکریز و پل بود، که این موجب شده بود اختلاف فاز از  $\pi$  بیشتر شود. برای حل این مشکل مجبور به ماسک پل از پردازش‌های TSX شدیم.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه تغییر شکل خاکریزهای میان‌گذر دریاچه ارومیه در بازه‌ی زمانی ۲۰۰۳-۲۰۱۳ که در این دوره با هیچ ابزار ژئودتیکی پایش نشده بود، با استفاده از داده‌های تداخل‌سنجی راداری محاسبه شد. این میان‌گذر از دو خاکریز غربی و شرقی تشکیل شده است. به‌منظور اتصال دو خاکریز، پلی به طول ۱۳۰۰ متر در سال ۲۰۰۹ ساخته شده است. این پل که از پروژه‌های عظیم ایرانی به شمار می‌رود، نقش مهمی در توسعه‌ی گردشگری، حمل‌ونقل و بازرگانی دارد. از آنجا که تغییر شکل نامتقارن خاکریزهای موجود در طرفین پل ممکن است به سلامت پل آسیب برساند، مسأله پایش خاکریزها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

## مراجع

- [1] G. B and I. D, "Structural Monitoring of Concrete Bridges during Whole Lifespan," 2002.
- [2] T. R. Lauknes, "Long-Term Surface Deformation Mapping using Small-Baseline Differential SAR Interferograms," Candidatus Scientiarum, Department of Physics, University of Tromsø, 2004.
- [3] M. Motagh, J. Klotz, F. Tavakoli, Y. Djamour, S. Arabi, H.-U. Wetzel, and J. Zschau, "Combination of precise leveling and InSAR data to constrain source parameters of the Mw = 6.5, 26 December 2003 Bam earthquake," Pure and Applied Geophysics, 2006.
- [4] W.-C. Hung, C. Hwang, Y.-A. Chen, C.-P. Chang, J.-Y. Yen, A. Hooper, and C.-Y. Yang, "Surface deformation from persistent scatterers SAR interferometry and fusion with leveling data: A case study over the Choushui River Alluvial Fan, Taiwan," Remote Sensing of Environment, 2010.
- [5] A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, "Permanent Scatterers in SAR Interferometry," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing vol. 39, pp. 8-20, 2001.
- [6] M. Motagh, J. r. Hoffmann, B. Kampes, M. Baes, and J. Zschau, "Strain accumulation across the Gazikoy-Saros segment of the North Anatolian Fault inferred from Persistent Scatterer Interferometry and GPS measurements," Earth and Planetary Science Letters, vol. 255, pp. 432-444, 2007.
- [7] P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti, "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 40, pp. 2375-2383, 2002.

- [8] J. Anderssohn, M. Motagh, T. R. Walter, M. Rosenau, H. Kaufmann, and O. Oncken, "Surface deformation time series and source modeling for a volcanic complex system based on satellite wide swath and image mode interferometry: The Lazufre system, central Andes," *Remote Sensing of Environment*, vol. 113, pp. 2062-2075, 2009.
- [9] M. Motagh, H.-U. Wetzel, S. Roessner, and H. Kaufmann, "A TerraSAR-X InSAR study of landslides in southern Kyrgyzstan, Central Asia," *Remote Sensing Letters*, 2013.
- [10] C. Colesanti, A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, "Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique," *Engineering Geology*, vol. 68, pp. 3-14, 2003.
- [11] J. Ruch, J. Anderssohn, T. R. Walter, and M. Motagh, "Caldera-scale inflation of the Lazufre volcanic area, South America: Evidence from InSAR," *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2008.
- [12] M. Motagh, Y. Djamour, T. R. Walter, H.-U. Wetzel, J. Zschau, and S. Arabi, "Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, levelling and GPS," *Geophysical Journal International*, 2007.
- [13] F. Amelung, D. L. Galloway, J. W. Bell, H. A. Zebker, and R. J. Lacznik, "Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation", *Geology*, vol. 27, pp. 483-486, June 1, 1999.
- [14] J. W. Bell, F. Amelung, A. Ferretti, M. Bianchi, and F. Novali, "Permanent scatterer InSAR reveals seasonal and long-term aquifer-system response to groundwater pumping and artificial recharge," *Water Resour. Res.*, vol. 44, p. W02407, 02/05 2008.
- [15] J. r. Hoffmann, H. A. Zebker, D. L. Galloway, and F. Amelung, "Seasonal Subsidence and Rebound in Las Vegas Valley, Nevada, observed by Synthetic Aperture Radar Interferometry," *Water Resour. Res.*, vol. 37, pp. 1551-1566, 2001.
- [16] M. Motagh, J. Hoffmann, B. Kampes, M. Baes, and J. Zschau, "Strain accumulation across the Gazikoy-Saros segment of the North Anatolian Fault inferred from Persistent Scatterer Interferometry and GPS measurements" *Earth and Planetary Science Letters*, 2007.
- [17] Y. Fialko, "Interseismic strain accumulation and the earthquake potential on the southern San Andreas fault system," *Nature*, vol. 441, pp. 968-971, 2006.
- [18] A. Hooper, "A combined multi-temporal InSAR method incorporating Persistent Scatterer and Small Baseline approaches," 2007.
- [19] B. Kampes, R. Hanssen, and Z. Perski, "Radar Interferometry with Public Domain Tools," in *Fringe 2003*, 2003.
- [20] A. Hooper, H. Zebker, P. Segall, and B. Kampes, "A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 31, p. L23611, 2004.
- [21] R. F. Hanssen, "Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis," ISBN-10: 0792369459, 2001.